

# 航空遥感测量海面油膜厚度的研究\*

杨跃忠 卢桂新 钟其英

黄彦禄 周昭仲

(中国科学院南海海洋研究所)

(中国科学院广州电子技术研究所)

1991年12月25日收稿

## 摘 要

本文根据3层介质微波辐射的基本原理,分析计算了各介质和环境参数对油膜厚度的影响大小,并以此为依据探讨了确定各参数的方法。通过露天水池试验给予验证。提出了在单波段(8mm)固定天线微波辐射计获取海水区与油膜区天线亮(度)温(度)两参数条件下的航空遥感南海海面油膜厚度计算模式,海上航空遥感测量实验与模式计算结果基本符合。

**关键词** 油膜 遥感 微波 海

为了测定海面油溢量,首先必须测量和计算海面油膜厚度。使用单波段(8mm)固定天线型微波辐射计进行航空遥感时,直接测量的是海水区的天线亮(度)温(度)  $T_{AW}$  和油膜区的天线亮温  $T_A$ 。两个参数。但在关于油膜厚度的基础公式中,还有另外一些变量,如何把这些变量参数化,这是建立航空微波遥感海面油溢量工作模型所要解决的一个主要问题。本文从估计有关参数误差对计算结果的影响入手,分析、探讨了确定这些参数的方法;提出了适应实际应用的计算方案并编制软件,用以处理实验数据,提取油膜厚度信息。最后采用水池试验及飞行试验,检验了计算结果。

## 一、基本理论

在没有风浪的情况下,空气—海水界面的发射率由菲涅尔公式决定<sup>[1]</sup>。在平静海面上浮着一薄层油膜,即构成空气—油膜—海水3层介质,按照多次反射公式,可计算油膜处的反射率  $R_{od}$ <sup>[2]</sup>:

$$R_{od} = \frac{(1 - R_{21}^2(\theta))(1 - R_{32}^2(\theta)e^{-2\beta}) - 4R_{32}(\theta)R_{21}(\theta)e^{-\beta} \sin(\phi_{32} + \alpha) \sin \phi_{21}}{(1 + R_{32}^2(\theta)R_{21}^2(\theta)e^{-2\beta}) + 2R_{32}(\theta)R_{21}(\theta)e^{-\beta} \cos(\phi_{32} + \phi_{21} + \alpha)} \quad (1)$$

式中,  $\theta$  是入射角;  $R_{21}, R_{32}$  分别为油—空气、海水—油界面的菲涅尔反射系数;  $\phi_{21}, \phi_{32}$  分别为  $R_{21}, R_{32}$  的相位角,是与介质的介电常数、入射角有关的参数;  $\alpha$  和  $\beta$  是介电常数和油膜厚度的函数。

海水的介电常数是频率、物理温度和盐度的函数,国际上已有多个计算模式,但在8mm波段与实验数据偏差较大。钟其英等提出的科南模式<sup>[3]</sup>,其准确度提高了1—4倍。本文采用科南模式进行计算。

\* 参加本项研究工作的还有邓崇仁、杨虹、陈维钧和赖桂清。

当油膜厚度为 0 时,由(1)式可得出海水的反射率  $R_W$ ; 假定海水与油膜的物理温度相同,测量频率、极化方式和入射角固定,油种和水温已知,则可得出水面和油膜的固有亮温差  $\Delta T_B$  与油膜厚度  $d$  的关系:

$$\Delta T_B = T_o(R_{od} - R_W) = T_o R(d) \quad (2)$$

式中,  $T_o$  是海水的物理温度,  $R(d)$  表示当其它参数固定时,油—水反射率差为膜厚  $d$  的函数。

实际测量时微波辐射计接收到的信号,不只是目标物的固有亮温,目标物的反射辐射及微波辐射计本身的效率,对其输出信号的影响也不能忽略。

于是,仪器测量到海水与油膜的亮温差为表观亮温差  $\Delta T_A$ , 它与  $\Delta T_B$  的关系是<sup>[4]</sup>:

$$\Delta T_B = \frac{\Delta T_A}{\eta_a(1 - T_{sky}T_o)} \quad (3)$$

式中,  $\eta_a$ ——天线主瓣效率;  $T_{sky}$ ——天空辐射亮温。

## 二、工作参数和油膜厚度的关系

由上述公式(1)至(3)可知,由测量的表观亮温值推算海面的油膜厚度,需决定多个参数。为使测量结果具有较高的准确度,确实能满足实际应用业务的要求,必须对这些参数进行认真的分析,考察它们各自对油膜厚度测量的影响,为选择和定值提供依据。这些参数包括极化方式、入射角、海水温度、油和水介电常数的实部和虚部、天空辐射以及海况等,下面分别加以讨论。其中,关于极化方式、入射角、油和水介电常数影响的图和表是利用基本公式(1)改变相应参数值而得出的。

### 1. 极化方式

微波辐射计天线有两个安装方向:天线的长轴或短轴与入射面一致,不同的安装方

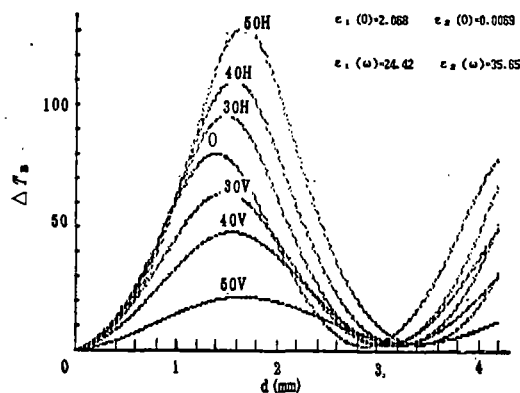


图 1 不同极化方式、不同入射角下油膜厚度  $d$  与亮温差的关系  
Fig. 1 The relation between the oil film thickness ( $d$ ) and the brightness temperature difference at different polarization component and different incidence angle

向可测量不同极化方向的辐射,但一般地在测量时只能固定使用一个方向。图 1 给出了不同极化方式、不同入射角下,油膜厚度  $d$  和亮温差  $\Delta T_B$  的关系。可见,当其它参数一定,当油膜厚度大于  $0.05\text{mm}$  时,水平极化的亮温差  $\Delta T_B$  较大。海面油膜测量以选择水平极化方式为好。

## 2. 入射角

在航空遥感测量时,辐射计的安装方向一般是固定的。入射角的变化引起发射率的变化。图 2 给出不同油膜厚度时,发射率变化量  $\Delta e$  和  $-\partial(\Delta e)/\partial d$  随入射角  $\theta$  的变化过程。当  $d = 0.5\text{mm}$  时,两者随  $\theta$  增大而减小;在  $d = 1.3\text{mm}$ ,入射角小于  $55^\circ$  时,两者随  $\theta$  增大而递增。

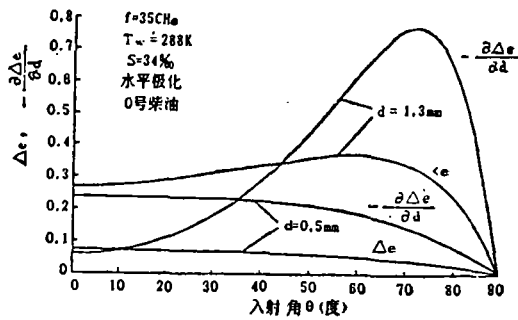


图 2 不同油膜厚度时发射率变化量  $\Delta e$  和  $-\partial(\Delta e)/\partial d$  与入射角  $\theta$  的关系

Fig. 2 The relation between the emissivity increase ( $\Delta e$ ),  $-\frac{\partial(\Delta e)}{\partial d}$  and incidence angle

表 1 给出了不同膜厚下不同入射角的影响情况。在表 1,  $\theta$  的单位是度,  $d_1$ ,  $d_2$  和  $d_3$  分别代表不同的油膜厚度,单位为 mm,  $P$  是每改变  $10^\circ$  时膜厚值改变量的百分比。从表 1 可见,当  $\theta$  每改变  $10^\circ$ ,  $d$  的误差约为  $0.35\%$  左右。

表 1 不同  $\theta$  值对膜厚计算值的影响

Table 1 The effect of different  $\theta$  on the calculation of oil film thickness

$\theta$	$d_1$	$d_2$	$d_3$
10	0.130	0.188	0.235
15	0.132	0.190	0.237
20	0.135	0.193	0.242
P(%)	0.38	0.37	0.30

因此  $\theta$  的大小应视当时待测海面油厚的大小而定。不过,  $\theta$  的增大受设备条件限制,不能任意变化。一般地,当海面油膜较厚时,选用  $30-40^\circ$  的入射角较好;但当油膜较薄时,则用  $15^\circ$  左右的入射角为宜。同时,飞机飞行时姿态不稳定引起角度变化造成的偏差并不大。

### 3. 油的介电常数实部 $\epsilon_1'$

图 3 是以  $\epsilon_1'$  为参数的  $d-\Delta T_B$  曲线, 不同  $\epsilon_1'$  对应不同的膜厚。当  $\epsilon_1'$  变化 0.1 时,  $d$  的平均变化率约 7%。

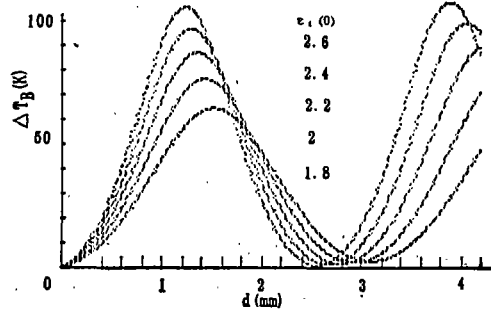


图 3 油介电常数的实部对油膜厚度测量的影响

Fig. 3 The effect of the real part of the oil dielectric constant on measuring of oil film thickness

### 4. 油的介电常数虚部 $\epsilon_2'$

图 4 是各  $\epsilon_2'$  值下的  $d-\Delta T_B$  曲线, 在  $d < 0.5$  时, 各条曲线几乎重复在一起, 所以若  $d$  较小,  $\epsilon_2'$  引起  $d$  的误差很小, 可以忽略。

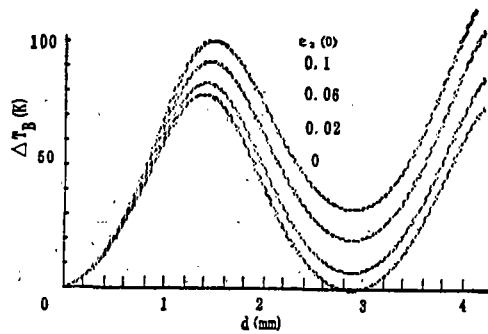


图 4 油介电常数的虚部对油膜厚度测量的影响

Fig. 4 The effect of the imaginary part of the oil dielectric constant on measuring of oil film thickness

### 5. 水的介电常数 $\epsilon_1$ 和 $\epsilon_2$

水的介电常数对  $d$  的影响主要由海水发射率的变化引起。其它条件不变, 分别改变  $\epsilon_1$  和  $\epsilon_2$  对不同油膜厚度  $d_1, d_2$  和  $d_3$  的影响见表 2 和表 3。

表中,  $p$  是  $\Delta\epsilon_1 = 1$  时,  $d$  的相对变化量。可见, 海水介电常数实部对油膜厚度计算结果影响较大, 当  $\Delta\epsilon_1 = 1$  时, 厚度测量会产生 1% 的误差; 虚部影响较小, 当  $\Delta\epsilon_2 = 1$  时, 只产生 0.25% 的误差。

表 2  $\epsilon_1$  变化对不同膜厚计算的影响  
 Table 2 The effect of  $\epsilon_1$  changing on the calculation of different thickness of the oil film

$\epsilon_1$	$d_1$	$d_2$	$d_3$
28.93	0.258	0.207	0.113
27.93	0.256	0.206	0.111
26.93	0.255	0.204	0.110
25.93	0.253	0.202	0.109
24.93	0.251	0.201	0.107
23.93	0.249	0.199	0.106
P(%)	0.71	0.78	1.3

表 3  $\epsilon_2$  变化对不同膜厚计算的影响  
 Table 3 The effect of  $\epsilon_2$  changing on the calculation of different thickness of the oil film

$\epsilon_2$	$d_1$	$d_2$	$d_3$
38.4	0.254	0.178	0.085
37.4	0.254	0.178	0.085
36.4	0.253	0.177	0.084
35.4	0.253	0.177	0.084
34.4	0.251	0.176	0.084
33.4	0.251	0.176	0.084
P(%)	0.24	0.23	0.23

## 6. 海水温度

水温对膜厚测量计算结果的影响是多方面的。由式(3)可见,  $T_0$  的误差引起固有亮温差  $\Delta T_B$  的误差:

$$\left(\frac{\partial \Delta T_B}{\partial T_0}\right) / \Delta T_B = -\frac{T_{sky}}{T_0(T_0 - T_{sky})}$$

当  $T_{sky} \approx 30K$ ,  $T_0 \approx 300K$  时, 则  $\Delta T_B$  的相对误差为 0.03%/K。即  $T_0$  变化对  $\Delta T_B$  从而对膜厚  $d$  的影响很小。

其次, 考虑海水介电常数也随  $T_0$  而变, 则当其它条件保持不变时, 改变水温  $T_0$  会引起油膜厚度计算值的变化, 计算误差约为 0.5%。

油的介电常数是温度的函数, 海面油膜的温度可以认为与水温相同。在 25°C 附近, 轻油  $\epsilon_1$  的温度变化率约 0.02—0.05/°C。由上面的讨论可知, 对应的膜厚测量误差约为 1—3%/°C, 这一影响是比较大的。

## 7. 天空辐射

由式(3)对  $T_{sky}$  求偏导, 得

$$\left(\frac{\partial \Delta T_B}{\partial T_{sky}}\right) / \Delta T_B = -\frac{1}{T_0 - T_{sky}}$$

当水温  $T_0 = 27^\circ\text{C}$ ,  $T_{ky} = 30\text{K}$  时,  $\Delta T_B$  的相对偏差为  $0.4\% \text{K}$ 。

当天气由晴朗、干燥变为阴天时, 天空亮温可由  $10\text{K}$  变到  $40\text{K}$ , 下雨天天天空亮温将更高。如果不进行修正, 厚度误差将达到  $7\%$  之多。

## 8. 海况

海面是粗糙面和有泡沫时, 在频率  $< 40\text{GHz}$ 、风速  $< 25\text{m/s}$  情况下, 海水的发射率可用下面的经验公式表示<sup>[5]</sup>

$$\varepsilon_p(\theta) = (\varepsilon_{sp} + \Delta\varepsilon_{rp})(1 - F) + \varepsilon_{fp}F \quad (4)$$

其中,  $\varepsilon_{sp}$  为面发射率,  $\Delta\varepsilon_{rp}$  为粗糙面发射率的贡献,  $\varepsilon_{fp}$  为泡沫的贡献,  $F$  为泡沫有效覆盖部分。

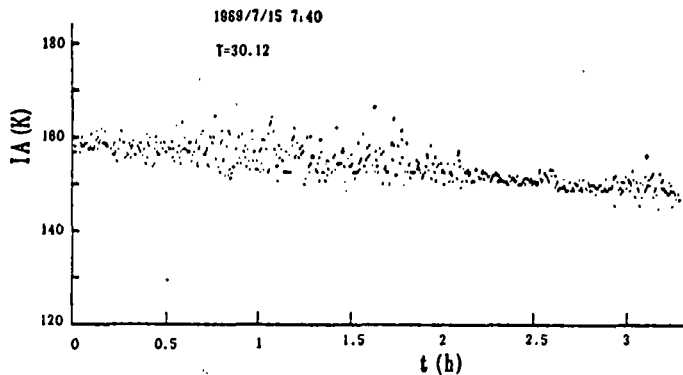


图 5 用船载海洋微波辐射计测量的海水亮温值

Fig. 5 The measuring values of sea water brightness temperature in situ during ship drift

若不考虑泡沫, 根据文献[5]给出的公式和数据, 当水温为  $27^\circ\text{C}$  时,  $\varepsilon_{sp} = 0.447$ , 风速  $V = 0$  时,  $\Delta\varepsilon_{rp} = -0.023$ , 得  $T_B = 127\text{K}$ ; 风速  $V = 5\text{m/s}$  (和风) 时,  $\Delta\varepsilon_{rp} = -0.012$ , 得  $T_B = 130.5\text{K}$ , 海水亮温增高  $4\text{K}$ ; 若  $V = 10\text{m/s}$  时, 亮温增加可达  $7\text{K}$ 。

我们进行过海况影响实验(图5)。这是用船载海洋微波辐射计<sup>1)</sup>在海上的测量记录数据整理得出的。测量时, 海上有阵风, 亮温平均变化  $10\text{K}$ , 由于船有摇动等因素, 数据较为分散。从理论分析和我们的实测看, 海况的影响是不能忽视的。对粗糙的和有泡沫的海面进行航空微波遥感测量时, 必须对由它而引起的亮温增量予以考虑。

由上述对各个因素的分析可见, 在各种影响因素中, 对膜厚计算值影响较大的参数有海水和油的介电常数实部  $\varepsilon_1, \varepsilon_1'$ , 水温  $T_0$ , 天空亮温  $T_{ky}$  和海况。

## 三、海面油膜厚度计算的参数化和计算方法

航空微波遥感实际上只有两个可测量的量, 由基本公式(1)–(3)可见, 除了膜厚以外,

1) 卢桂新等, 测量海面辐射的船载微波辐射计, 1991年。

还有一系列变量需要参数化。参数选择方法如下：(1) 测量仪器的特性参数 如天线效率和主瓣效率,当仪器确定后,是已知的参数;(2) 仪器安装参数 如极化方式选择为水平方式,入射角则根据探测膜厚的估计而定,对轻油,入射角  $\theta$  选为  $15^\circ$  左右;(3) 油的介电常数 飞行时观测判别油的种类,由有关数据库检出,并加以温度修正;(4) 水温 在单波段微波遥感中,往往用亮温反演水温的值,但是,在  $8\text{mm}$  波段,用上述方法确定水温的误差较大。考虑到南海大多数海域水温的分布和变化已有很多资料,故可按照油膜区的经纬度,由南海水温分布和变化数据库检索给出;(5) 水的介电常数 根据有关公式得出,我们选用文献[3]给出的科南模式由水温计算。对  $8\text{mm}$  波段,盐度影响可忽略不计;(6) 天空亮温 由水温和微波辐射计测量的海水亮温计算得出。

按照基本公式和上述讨论,我们决定把仪器特性参数和安装参数作为已知参数,把水温和油的介电常数作为基本参数,根据微波辐射计实测的  $T_{AW}$  和  $T_{AO}$ ,来计算海面油膜厚度,编制了计算机软件,处理航空遥感所得到的数据。由于公式(1)中,膜厚  $d$  不是其它变量的显函数,不便于直接计算,因此,计算是采用变动  $d$  的逐步逼近方法进行的。

该软件由 4 个功能模块组成:(1) 数据输入模块:输入各种参数及测量数据;(2) 介电常数和天空亮温计算模块:有 3 个子功能,即根据水温计算海水介电常数、进行油介电常数的温度修正以及根据水温和微波辐射计测量得到的海水亮温计算天空亮温值;(3) 油膜—海水亮温差计算模块:由微波辐射计的天线亮温差计算出固有亮温差;(4) 油膜厚度计算模块:这是本软件的主要功能模块,给定测量准确度  $E$ ,根据第三个模块的输出,通过逐步逼近算法,确定每一测量点的油膜厚度。

## 四、实验结果

### 1. 露天水池试验

露天水池试验的目的是要具体了解在上述选择的测量仪器和基本工作参数条件下,油膜有效发射率亮温差和油膜厚度的关系,并对其它工作参数作出估计,试验于 1987 年 11—12 月进行。

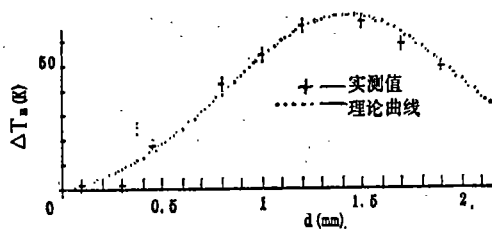


图 6 在  $25^\circ$  入射角和垂直极化方式下 14 号机油的油膜厚度与亮温差的关系

Fig. 6 The relation between oil film thickness and brightness temperature difference of 14# engine oil at  $25^\circ$  incidence angle and the vertical polarized component

在每次测量过程中,对不同极化方式,改变入射角,分别测量盐水的天线亮温  $T_{AW}$ ,

和不同厚度油膜的天线亮温  $T_{AO}$  同时用微波辐射计测量天空亮温  $T_{Ay}$ , 用温度计测量水温 and 用带刻度真空漏斗测膜器测油膜厚度, 用来验证由亮温差计算的厚度值。

所得数据按公式(3)处理。当入射角为  $0^\circ$  时, 由于辐射计本身正对水面, 受仪器辐射影响, 修正公式中应多加一个修正项。

露天水池试验结果见图 6—7。从各个图的曲线来看, 测量结果与理论计算曲线十分吻合, 说明选择的仪器和工作参数是合理的可行的。实测数据与理论曲线的偏差, 主要是由于实验时受的风影响, 导致水池油膜分布不均匀所造成的。

### 2. 海上航空试验

海上航空试验于 1989 年 7 月 15 日在南海下川岛以西海面, 即  $21^\circ 32'N, 112^\circ 20'E$  的海区内进行。飞机为运-5 型, 航高 50—200m, 航速 150km/h ( $\approx 41/sec$ )。机载仪器有脉冲噪声注入零平衡型微波辐射计, 频率为 34.75GHz, 灵敏度  $0.5K(\tau = 1sec)$ 。输出设备为函数记录仪, 走纸速度 400mm/min。使用船只为“实验 3”号海洋调查船, 船载设备有气象观测仪、8mm 微波辐射计、漏斗式测膜器和 CTD 温盐深测量仪。布放油种为轻柴油, 数量 4.3t。

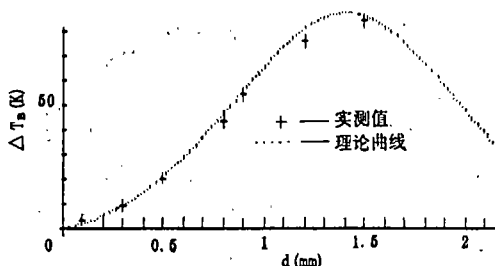


图 7 在  $25^\circ$  入射角和水平极化方式下 14 号机油的油膜厚度与亮温差的关系

Fig. 7 The relation between oil film thickness and brightness temperature difference of 14# engine oil at  $25^\circ$  incidence angle and the horizontal polarized component

实测试验前用调查船布油, 布油 15min 后进行航空遥感测量, 在海流作用下, 布的油很快流成一条油带。布油分两次进行, 时隔约 5min, 因此, 油带也分为两段。为了指引飞行路线, 派出两只作识别标志用的小艇置于油区的前端和后端。在飞行时, 还有第三条小艇在油带中的不同地点, 随机地用漏斗式测膜器进行取样测定油膜厚度。实测油膜厚度数据见表 4。在飞行期间共测量 8 次, 油厚平均为 0.18mm。

表 4 小艇测量的油膜厚度 (mm)

Table 4 The measured thickness values of the oil film on boat

时间	16:23	16:27	16:28	16:30	16:35	16:37	16:50	16:55
膜厚	0.33	0.03	0.11	0.80	0.01	0.01	0.02	0.17

平均值 = 0.18

“实验3”号调查船则进行气象、海水温、盐度的测量,并用船载微波辐射计测定无油污区海水的亮温。飞机沿布油区纵向飞行,获得了一组实测曲线。

图 8 给出了航空遥感测得的一条曲线,布油区明显可见,且都具有油带分段的特征。但因为测量仪器的时间常数较大,与飞行速度不匹配,油带断开处的亮温差偏大。把测量曲线数据读出输入计算机,由计算机软件处理得出油膜厚度沿飞行航线的断面分布曲线(图 9)。

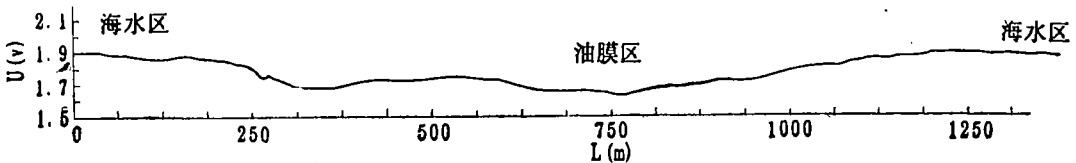


图8 航空遥感海面天线亮温电压值(实测曲线)

图 8 航空遥感测量的海面天线亮温曲线

Fig. 8 The measured curve of antenna brightness temperature of sea surface by airborne remote sensing

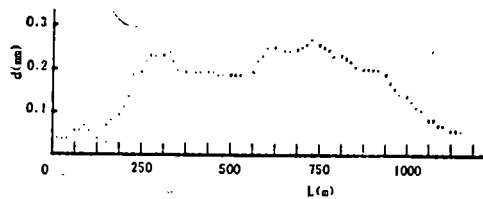


图 9 油膜厚度沿飞行航线的断面分布曲线

Fig. 9 The longitudinal distribution of the oil film thickness

由这些曲线计算出的油膜厚度约为 0.1—0.2mm,与小艇测量的平均值接近。油带长度约 1 000m,与船测结果相近。由船上测得平均油带宽度为 35m,最后计算出油溢量为 5.5t,误差为 27.8%。

## 五、小 结

我们根据微波辐射基本理论,具体地讲以普朗克公式、菲涅尔公式、海面辐射-反射基本关系为依据,由 3 层介质理论所导出的油膜反射率公式、介质固有亮温与天线亮温的关系,以及海水介电常数的计算模式等为基本算法公式,通过实验和理论分析,确定了基本算法公式中各参数之间的关系及参数计算值,建立起一个航空微波遥感海面油膜厚度计算方法,并编制了相应软件,在计算机上实现了航空遥感南海海面油膜厚度自动、定量和快速运算。露天水池试验和海上飞行试验得出的水面油膜厚度,与实验结果比较吻合。

在建立模式过程中,用海上实测油膜厚度来检测遥感计算结果是十分重要的。漏斗式测膜器室内水池试验时效果很好,但在海上测量则遇到困难,数据离散度很大。目前,海上实测油膜厚度的方法,大概都碰到船只靠近油膜时的影响较大这一问题。我们采取多

位置(油带边沿,中间)多次测量取平均的方法,所得结果较为接近,这对于在数量级精度上来评价模式有所帮助。

在实际遥感测量过程中,影响油膜厚度计算准确度的因素较多,且各因素之间还有互相作用,因此,完整的描述较复杂。作为一种处理模式,我们首先考虑各因素独立作用,因为这是一级效应。各因素之间相互作用,实际上是二级效应,文中主要考虑了海水温度对介电常数等的影响。事实上,二级效应较大的因素还有海况。它对偏振方向和介电常数都有作用。但限于条件,我们只能对其作总的估计,未能进一步讨论。因此,可以认为本模式较为适用于低海况和轻油污染的油溢估算和监测。对风浪海面和油介电常数的影响等问题,尚有待进一步的研究。

### 参 考 文 献

- [1] 周秀骥等,大气微波辐射及遥感原理,科学出版社,1982年。
- [2] Богородский В.В. и др; Труд ГГО, № 371, Р 22—36, 1976。
- [3] 钟其英、杨跃忠、黄彦禄、周昭仲, 8mm 波段水介电常数计算模式的研究,热带海洋, (2),1991。
- [4] 朱林范等,微波遥感估算水面溢油容量的实验探讨,东海海洋,4(1), 1986。
- [5] Pandey P.C. et al., An Empirical Microwave Emissivity Model for a Foam-Covered Sea, DIGEST V.1, WP-31. 2, 1982。

## A Study on Measuring the Thickness of Oil Film on the Sea by Airborne Remote Sensing

Yang Yuezhong et al.

(South China Sea Oceanology Institute of Academic Sinica)

### Abstract

On the basic microwave radiation theory of three layered media, the effects of various media and environment parameters on the oil film thickness were analysed and calculated. The method of determining parameters was discussed. It was tested and verified with open pool experiments. In condition of obtaining two parameters of antenna brightness temperature at seawater area and the oil film area with single microwave radiometer (8mm) of fix antenna, the model of calculating the oil film thickness of south China sea with airborne remote sensing was developed. The measured results over sea were closed with calculated values of the model.

**Key words** Oil film Remote sensing Microwave Sea